



Nuclear Electric Resonance in Gate-Defined GaAs Quantum Point Contact

著者	HASAN Nailul
number	82
学位授与機関	Tohoku University
学位授与番号	理博第3152号
URL	http://hdl.handle.net/10097/00123955

論文内容要旨

(NO. 1)

氏 名	Nailul Hasan	提出年	平成 30 年
学位論文の 題 目	Nuclear Electric Resonance in Gate-Defined GaAs Quantum Point Contact (ゲートにより閉じ込められた GaAs 量子ポイントコ ンタクトの核電気共鳴)		

論文目次

1. Introduction
2. Theoretical background
3. Apparatus and Measurement Techniques
4. Resistively detected NMR in Quantum Point Contact
5. Resistively detected NER in Quantum Point Contact
6. Summary and Outlook
7. Appendix

Abstract

The ability to generate and manipulate local nuclear spin polarization in semiconductor quantum systems is paramount to realize nuclear spintronic devices . For a semiconductor with s-wave conduction band like GaAs, one can exploit a rather strong hyperfine interaction to generate and manipulate an ensemble of nuclear spins electrically. With electrostatic gating, we can engineer a situation in which electrons are forced to flow into a few tens of nanometer wide slit. This way, one has an opportunity to polarize nuclear spins locally within the constriction. Furthermore we will demonstrate here that the same gating used to define the constriction can also be used to manipulate the polarized nuclear spins through electric quadrupole interaction. It presents an alternative way of manipulating the nuclear spin with spin greater than 1/2 other than with radio frequency (RF) coils routinely employed. The first demonstration of nuclear spin manipulation by gate electric field, conveniently called nuclear electric resonance (NER), was carried out at a spin transition of fractional filling factor 2/3 in the quantum Hall regime. The RF electric field applied to a gate excites spatial oscillations of the domain walls which occurs at around the phase transition point between the spin-polarized and unpolarized states of the quantum Hall system at

Landau level filling factor $\nu = 2/3$ and thus temporal oscillations of the hyperfine field to nuclear spins. The work was further extended to a gate-defined quantum wire with similar filling setting to the first one, invoking the domain wall oscillation inside the wire. Further study revealed that NER signals were present even in the absence of domain walls, to which they ascribed their findings due to electric quadrupole interaction between nuclear spin $3/2$ and ac electric field from the gate. From practical point of view, the second type NER is more desirable to pursue as it alleviates a need for a high-mobility GaAs device because the second type can be done in the integer quantum Hall breakdown. For this sole purpose, the present study is devoted to realize the second type NER in a confined geometry in the integer quantum Hall breakdown. The confinement is realized by a gate-defined short quantum wire or quantum point contact to bring and introduce the sense of locality to NER.

The purpose of this thesis is to demonstrate the second type local NER in the integer quantum Hall breakdown in a confined quantum point contact. For the sake of clarity, we compare the observed NER signal with NMR signal induced by RF coils and draw a conclusion. To further complete our investigation, we study how the NER and NMR signal are affected by shifting the channel position in lateral direction.

The wafer structure of the sample consist of a 20 nm GaAs quantum well (QW), which is located 130 nm below the sample surface. Using constant current measurement, $I=5$ nA. The low temperature electron mobility is $30 \text{ m}^2/\text{Vs}$ at an electron density of $3.86 \times 10^{15} \text{ m}^{-2}$. The QPC is defined by triple Schottky gates which is patterned on top of the Hall bar by Ti/Au evaporation. The bulk 2DEG density n can be tuned by applying back-gate voltage (V_{bg}) to Si-doped GaAs substrate. For NMR measurement, a six turn coil is wound around the sample. Coil is connect radio frequency (RF) generator to generate the radio frequency (RF) magnetic field. For NER basically the measurement setup RF voltage was superimposed on split gate through a bias tee to produce a RF-electric field

I can clearly see the RDNER signals in the region where filling factor becomes less than 1 in the center of the QPC. The presence of $2f$ signals by applying the RF voltage to one of the two split gates confirms successful RDNER caused by external RF electric field as we know that $2f$ -NMR is very weak. The NER signal is clearer and larger than NMR signal, suggesting advantage of NER to study nuclear resonance in QPC devices. The NER signal increases with amplitude of applied RF voltage; however, it saturates and starts to decrease with further increasing RF power. That means almost constant NER signal independent of the RF power in a certain range of the input power. Such behavior is different from the observation in RDNMR where signal amplitude increases monotonically with RF power applied to the coil. My finding is different from the experimental result reported by Miyamoto et al. They reported NER based on the domain oscillation and signals appear close to the filling factor $2/3$. However, the NER reported here is

based on electric quadrupolar coupling and signals appeared in the wide range of filling factors less than 1. It is clear from experimental results that electron channel position affects NER signal. NER signal can be maximized by pushing the electron channel closer to the split gate where RF voltage is applied. For outlook, it is expected to do similar NER experiments under electron-depleted condition by using pump-and-probe technique. Without electron channel, electric field distribution can be more easily assigned and a relation between electric field direction and NER signals becomes clearer. Such future experiments will further deepen our understanding in NER mechanism.

論文審査の結果の要旨

半導体量子構造における核スピン制御、あるいは核スピンをベースにした計測に向けて、抵抗で核スピン偏極情報を測定する抵抗検出 NMR (Nuclear Magnetic Resonance) が開発され、広く研究されている。この手法は NMR と言われるように、通常は試料に巻いたコイルから交流磁場を印加することで核スピンを制御している。これに対して、より空間分解能に優れた交流電場による制御が最近注目されており、NER (Nuclear Electric Resonance) と呼ばれている。現在、NER としては 2 種類が提案されている。一番目のタイプは、量子構造中の電子系に形成されるスピン状態が異なるドメイン構造を利用して、それを振動させて核スピン操作を行うものである。一方、二番目のタイプは、スピン数が $3/2$ 以上の核スピンで生じる電氣的四重極結合を利用して、交流電場で核スピン偏極を操作するものである。一番目のタイプについては、二次元系と、一次元系である量子ポイントコンタクト (QPC) の両方ですでに報告があるが、二番目のタイプについては二次元系での報告はあるものの、QPC での報告はなかった。Hasan Nailul の研究は、研究室で独自に開発した、制御性に優れた GaAs 系 QPC を用いて、電氣的四重極結合を利用した交流電場で制御する二番目のタイプの NER をはじめて QPC で実現し、さらに、バイアス条件を変えることで、このタイプの NER の物理をより明確にしようとする研究である。

実験には、通常の二つに分離したスプリット・ゲートに加えて、バックゲートとセンターゲートを有する高い制御性のある QPC を用いている。まず、対称に電圧を配置して、電子チャネルを QPC の中央に置いた状態で、片方のスプリット・ゲートに交流電圧を印加して、NER 信号を測定した。また、比較の意味で通常の NMR も測定している。過去に報告されたドメイン振動による NER と明確に区別するために、ドメイン構造の起源になる分数量子ホール効果が見えない比較的移動度の低いウェハから QPC を作製している。この構造でも整数量子ホール効果は明瞭に見えることから、QPC の外部の広い二次元系を充填率 2 に設定し、QPC 内部を充填率 1 近傍にすることで、QPC のエッジチャネル間散乱を利用した動的核スピン偏極を実現している。NER、NMR 信号はこの動的に偏極した核スピンを交流磁場あるいは交流電場で緩和することで測定された。

実験結果は、NMR、NER とともに QPC 内部の充填率が 1 を少し下回るところで信号が観測され、特に NER についてはそのメカニズムを反映して、通常の共鳴周波数の倍周波における信号も観測された。予想通り通常の NMR ではこの倍周波の信号は弱く、QPC において、電氣的四重極結合を利用した交流電場による核スピン操作、すなわち二番目のタイプの NER が実現されていることが確認された。

静磁場を量子井戸に垂直に加える本実験の場合、電氣的四重極結合を利用した NER では、基本周波数の信号は量子井戸に平行な電場成分、倍周波信号は量子井戸に垂直な電場成分に由来する。このことを確かめるために、QPC 中に形成される電子チャネルの位置をずらした非対称な状況での実験を行った。電子チャネルが交流電圧を印加するスプリット・ゲートから離れている場合には、交流電場がセンターゲートで終端されてしまい、一次元チャネルに届く垂直方向の電場成分が大幅に減少する。このことに対応して、電子チャネルが交流電圧を印加するゲートから離れている場合には、倍周波の NER 信号が大きく減少し、ほとんど観測されなくなることを確認した。この電子チャネルの非対称配置における実験は、電氣的四重極結合を利用した NER における電場方向の重要性をはじめて実験的に示したものであり、今後 NER のメカニズムをより詳細に追究する場合の足掛かりとなる。

以上の内容は、自立して研究活動を行うに必要な高度の研究能力と学識を有することを示している。したがって、Hasan Nailul 提出の博士論文は、博士 (理学) の学位論文として合格と認める。